



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG:** Diseño de resonadores y circuitos de microondas impresos en 3D

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

**AUTOR:** David Melgar Sanz

**DIRECTOR:** Ignacio Llamas-Garro

**SUPERVISOR:** José María González Arbesú

**FECHA:** 8 de febrero del 2019

**Título:** Diseño de resonadores y circuitos de microondas impresos en 3D

**Autor:** David Melgar Sanz

**Director:** Ignacio Llamas-Garro

**Fecha:** 8 de febrero del 2019

## Resumen

Este trabajo final de grado tiene como objetivo el diseño, simulación, impresión 3D y medición de un resonador basado en la cavidad resonante de guías de onda rectangular que sirva para la implementación de filtros, osciladores, medidores de frecuencia y otros dispositivos necesarios en los sistemas de telecomunicación.

El resonador se diseña para la banda de frecuencias  $K_u$ , que abarca el rango de frecuencias comprendido entre los 12 y 18 GHz.

Se usa el software de simulación electromagnética HFSS (High Frequency Structure Simulator) para el diseño y la simulación de la estructura resonante.

Se usa una impresora DLP, la MONO2 3D, para la impresión 3D de la pieza en resina para, posteriormente, pegar con cintas de cobre y metalizar la pieza y, de esta forma, convertirla en un prototipo económico de resonador. Como el método de metalización aplicado a esta pieza no es bueno, no se puede comprobar su funcionamiento práctico.

Por este motivo, se usa una impresora FDM para realizar otra impresión 3D de la estructura resonante con el material ABS, para posteriormente aplicar una galvanoplastia con níquel para metalizar la pieza impresa y convertirla en un prototipo económico. Finalmente, se comprueba su funcionamiento con el analizador vectorial de redes ROHDE & SCHWARZ ZVA 24 y se compara el resultado teórico con el práctico. Con las medidas se puede calcular el factor de calidad que, como era evidente, empeora muchísimo del caso teórico o simulado al caso real, después de imprimirlo y metalizarlo.

**Title:** Design of resonators and microwave circuits printed in 3D

**Author:** David Melgar Sanz

**Director:** Ignacio Llamas-Garro

**Date:** February 8 rd 2018

## Overview

The aim of this final degree project is the design, simulation, 3D printing and measurement of a resonator based on the resonant cavity of rectangular waveguides that serve for the implementation of filters, oscillators, frequency meters and other devices needed in telecommunication systems.

The resonator is designed for the Ku frequency band, which encompasses the range of frequencies between 12 and 18 GHz.

The electromagnetic simulation software HFSS (High Frequency Structure Simulator) is used for the design and simulation of the resonant structure.

The DLP printer MONO2 3D is used for 3D printing the piece in resin. After that the piece is metallized and pasted with copper tapes. In this way, it is turned into a prototype of a home resonator. As the metallization method applied to this piece is not suitable, it is not possible to check its practical operation.

For this reason, an FDM printer is used to perform another 3D printing of the resonant structure with the ABS material. Lately electroplating with nickel is applied to metallize the printed piece and turn it into a homemade prototype. Finally, its operation is checked with the ROHDE & SCHWARZ ZVA 24 vector analyzer and the theoretical result is compared with the practical one. With the measures it is possible to calculate the quality factor that, as was evident, the theoretical or simulated real case gets much worse after printing and metallizing it.

Quiero empezar agradeciendo a mis padres, por darme la oportunidad de vivir.  
Porque gracias a ellos soy quien soy actualmente y, espero en un futuro devolverles todo lo que me han dado sin recibir nada a cambio. Gracias por guiarme, por insistir y por la paciencia que habéis tenido estos casi 24 años.  
Gracias por ayudarme a llegar hasta aquí.

A mi hermano y a mi familia, por los que aún están y por los que se fueron, por estar siempre ahí, por cuidarme y apoyarme durante toda mi vida y sobretodo en la etapa académica que hoy finaliza.

A mi pareja, Cintia, por haber estado tanto en los buenos momentos como en los malos. Por apoyarme día tras día, por ayudarme a superar los baches en este trabajo final de grado y por transmitirme su paciencia que en ocasiones he necesitado.

A mis profesores que he tenido durante todas mis etapas académicas, por brindarme y transmitirme los conocimientos necesarios para poder llegar hasta aquí.

Al Dr. Ignacio Llamas-Garro por ser el tutor de este trabajo. Gracias por todo tu tiempo empleado en ayudarme, atendiéndome personalmente, brindándome información para el buen desarrollo de este proyecto.

A Pilar Soriano, por haberme enseñado a utilizar el HFSS, por resolverme muchas de las dudas iniciales que me surgían y por la ayuda aportada.

A Crislane Silva, por ofrecerme los conocimientos necesarios y la ayuda para imprimir el resonador 3D de resina en el CTCC.

A mis compañeros de todas mis etapas académicas, pero sobre todo los que han estado día a día a lo largo de estos años de universidad. Por todos esos momentos en las clases, los laboratorios, los proyectos grupales y las infinitas horas en la cafetería ayudándonos y resolviendo todos los problemas antes de los exámenes.

A mis amigos, por los que han estado siempre que los he necesitado, tanto para apoyarme como para distraerme en esos duros momentos.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estructura .....	2
<b>CAPÍTULO 2. RESONADORES DE MICROONDAS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Introducción .....	3
2.2 Factor de carga descargado.....	4
2.2.1 Resonancia en serie .....	4
2.2.2 Resonancia en paralelo.....	6
2.3 Extrayendo el factor de calidad .....	8
2.4 Herramientas para el análisis full-wave .....	11
2.5 Guías de onda .....	11
2.5.1 Guía de onda rectangular .....	11
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL RESONADOR.....</b>	<b>14</b>
3.1 Introducción .....	14
3.2 Diseño del resonador.....	14
3.2.1 Diseño con $k=1$ .....	15
3.2.2 Variación de las variables.....	18
3.2.3 Diseño exterior.....	20
3.3 Impresión 3D .....	25
3.3.1 Tipos de impresoras 3D .....	26
3.3.2 Impresión DLP .....	27
3.3.3 Impresión FDM .....	29
3.3.4 Comparación .....	30
3.4 Metalización .....	31
3.4.1 Metalización con cinta adhesiva de cobre.....	31
3.4.2 Metalización mediante galvanoplastia.....	33
3.5 Mediciones del resonador .....	34
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>41</b>
5.1 Referencias .....	41
5.2 Bibliografía de imágenes .....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Circuito resonante en serie.....	4
Fig. 2.2 Circuito resonante en paralelo.....	6
Fig. 2.3 Cavidad resonante de microondas.....	8
Fig. 2.4 Respuesta frecuencial de un resonador.....	10
Fig. 2.5 Esquema general de una guía de onda rectangular.....	12
Fig. 3.1 Plano 2D del resonador con las variables.....	15
Fig. 3.2 Diseño del resonador.....	17
Fig. 3.3 Respuesta frecuencial del resonador.....	17
Fig. 3.6 Plano del WR62.....	20
Fig. 3.7 Cavidad resonante y los flanges.....	20
Fig. 3.10 Respuesta frecuencial final del resonador de cobre.....	22
Fig. 3.11 Respuesta frecuencial final del resonador de cobre ampliada.....	22
Fig. 3.12 Respuesta frecuencial final del resonador de níquel.....	23
Fig. 3.13 Respuesta frecuencial final del resonador de níquel ampliada.....	24
Fig. 3.14 Resonador dividido por el plano magnético.....	25
Fig. 3.20 Cinta adhesiva de cobre.....	32
Fig. 3.21 Mitad del resonador metalizado.....	32
Fig. 3.22 Otra mitad del resonador metalizado.....	32
Fig. 3.23 Simulación del resonador con las medidas obtenidas con el pie de rey.....	34
Fig. 3.24 Kit de calibración.....	35
Fig. 3.27 Gráfica del parámetro S21 obtenido a partir del analizador.....	37
Fig. 3.28 Gráfica del parámetro S21 y BW <sub>-3dB</sub> .....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.2 Medidas de las tres coordenadas del resonador.....	16
Tabla 4.3 Medidas de las tres coordenadas de cada iris .....	16
Taula 4.4 Medidas de las tres coordenadas de cada puerto.....	16
Tabla 4.7 Variaciones de las variables del resonador .....	18
Tabla 4.8 Variables con sus longitudes finales.....	18
Tabla 4.9 Caracterización del resonador simulado en cobre .....	23
Tabla 4.10 Caracterización del resonador simulado en níquel.....	24
Tabla 4.11 Comparación entre las dos tecnologías de impresión usadas .....	30
Tabla 4.12 Frecuencias importantes con su parámetro S21 .....	37
Tabla 4.13 Características del resonador en la simulación y en la medición ...	39

## **LISTADO DE ACRÓNIMOS**

CTTC: Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

DLP: Digital Light Processing

EUDI: Escuela Universitaria de Diseño Industrial

FDM: Fused Deposition Modeling

HFSS: High Frequency Structure Simulation

SLA: Stereolithography Apparatus

SLS: Selective Laser Sintering

STL: Standard Triangle Language

TE: Transversal Eléctrico

TM: Transversal Magnético



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Actualmente, y en los últimos años que preceden, ha habido un enorme crecimiento de las aplicaciones donde las microondas están implicadas. Además, cada vez las tecnologías se desarrollan mucho más rápido y muchas de ellas quedan obsoletas, ya que se exige que los dispositivos tengan tamaños cada vez más reducidos, que se mejore el rendimiento que ya tienen y que sean más económicas que las ya existentes. Por este motivo, el diseño, la fabricación y la implementación de todos estos dispositivos que componen los sistemas de telecomunicación es un verdadero desafío constante.

Cabe destacar que los circuitos resonantes son utilizados en muchos de los campos existentes de las microondas, ya que son componentes imprescindibles en una gran variedad de dispositivos pasivos para los sistemas de telecomunicación. Ya sea de manera directa o indirecta, existen una gran variedad de aplicaciones donde aparecen estos resonadores: filtros [1], osciladores [2], medidores de frecuencia [3], divisores de potencia [4]...

Estos resonadores se elaboran con diferentes tecnologías de fabricación usando líneas de transmisión, las guías de onda, que forman una cavidad resonante, y guías dieléctricas. La principal función del resonador es la implementación de un filtro paso banda para posibles proyectos futuros que necesiten este tipo de componente.

El resonador propuesto en este proyecto se diseña especialmente para la banda  $K_u$ , cuyas frecuencias se sitúan dentro del rango de los 12 a los 18 GHz. Esta banda surgió cuando los radares se implementaron por primera vez en la banda K durante la Segunda Guerra Mundial y no se conocía que existiera una banda de absorción cercana a esa banda. Dicha banda de absorción se debe al vapor de agua y del oxígeno que se encuentra en la atmósfera y absorben las energías de dichas longitudes de onda. Por este motivo, la banda K se dividió en dos:  $K_u$  fue la banda inferior y  $K_a$  la banda superior. La banda P se utiliza principalmente para las comunicaciones por satélite, sobretodo en televisión y radares.

En este proyecto, se diseña, fabrica y caracteriza un resonador de cavidad de guía de onda rectangular. Este resonador se va a elaborar con dos tipos de tecnologías de impresión 3D y con dos tipos diferentes de metalizado para, posteriormente, testearla en el laboratorio y comprobar su funcionamiento. De esta forma, se puede obtener un resonador muy económico, de bajo peso, de elaboración sencilla y, si todo sale bien, con un buen factor de calidad, ya que, las guías de onda rectangulares tienen bajas pérdidas y un alto factor de calidad, además de ser estructuras eficientes para sistemas de comunicación y radares con manejo de alta potencia.

## **1.2 Objetivos**

El principal objetivo de este trabajo es el diseño y la simulación de un resonador en HFSS y la fabricación 3D para su posterior metalización y verificar su comportamiento. Este es el objetivo que establece el CTTC [5], ya que este proyecto se realiza en colaboración con ellos. El CTTC es una institución de investigación sin ánimo de lucro con sede en Castelldefels, resultado de una iniciativa pública de la Generalitat de Catalunya.

Para diseñar y fabricar este resonador, se han definido una serie de puntos estrictamente necesarios para alcanzar esta meta. Estos puntos se indican a continuación:

- Aprender a usar y adquirir un buen nivel con el software de simulación electromagnética ANSYS HFSS [6].
- Estudiar y repasar la teoría de resonadores de microondas [7].
- Diseñar y simular un resonador con dicho software.
- Obtener conocimientos básicos sobre diferentes tecnologías de impresión 3D.
- Imprimir el resonador diseñado con diferentes tipos de impresoras 3D.
- Metalizar las figuras impresas para poder caracterizar su comportamiento.
- Realizar mediciones con el analizador vectorial de redes y comparar el resultado teórico con el práctico.

## **1.3 Estructura**

Este proyecto final de grado consta de 5 capítulos. A continuación se resume de manera sencilla y breve el contenido de cada capítulo.

En este primer capítulo se presenta una breve motivación. Además, se introducen los objetivos que se quieren adquirir al finalizar el proyecto.

En el segundo capítulo se introducen los resonadores de microondas. Se describe de manera resumida el funcionamiento de éstos.

En el tercer capítulo se explica brevemente la teoría de filtros por guías de onda.

En el cuarto capítulo trata sobre el diseño del resonador que se quiere obtener, con su impresión 3D con diferentes tecnologías de impresión y dos tipos de metalizado. Para concluir este capítulo, se realizan mediciones con el instrumental del laboratorio del CTTC para evaluar el comportamiento del filtro obtenido.

En el quinto capítulo se presentan las conclusiones finales obtenidas con el proyecto ya finalizado.

En el sexto y último capítulo se incluye las referencias y bibliografía consultada.

## CAPÍTULO 2. RESONADORES DE MICROONDAS

### 2.1 Introducción

En este capítulo se resume la teoría y las principales características de los resonadores para microondas.

Un resonador es un dispositivo que emplea la resonancia para seleccionar determinadas frecuencias del conjunto de ondas electromagnéticas que lo atraviesan.

Los resonadores son elementos que sirven para crear diferentes dispositivos, como pueden ser filtros, medidores de frecuencia y osciladores, como los que se hacen referencia anteriormente. Depende del uso que se desea y de la frecuencia de trabajo donde funciona, el resonador se estudia y se diseña a partir de diversos métodos como son los circuitos equivalentes RLC con componentes físicos para bajas frecuencias, tecnología microstrip para bajas y altas frecuencias, guía de ondas y cavidad resonante solamente para altas frecuencias. En los próximos apartados se muestran las características principales de los diferentes resonadores nombrados anteriormente, concretamente los RLC y las guías de onda rectangulares.

En primer lugar se introduce en el apartado 2.2 el factor de carga descargado y, se analizan los circuitos resonantes de elementos agrupados en serie y paralelo, ya que la operación de los resonadores de elementos agrupados se puede entender con la ayuda de estos dos circuitos.

En el apartado 2.3 se obtiene el factor de calidad descargado para un resonador de elemento distribuido de longitud de onda  $\frac{\lambda}{2}$ .

En el apartado 2.4 se consideran todas las pérdidas del material, dando importancia a las pérdidas por conductores.

Finalmente, en la sección 3.5 se presenta una forma para extraer el factor de calidad descargado directamente de las mediciones. Este método es el que se utiliza para obtener las medidas reales en este proyecto y, de esta forma, poder caracterizar el resonador diseñado.

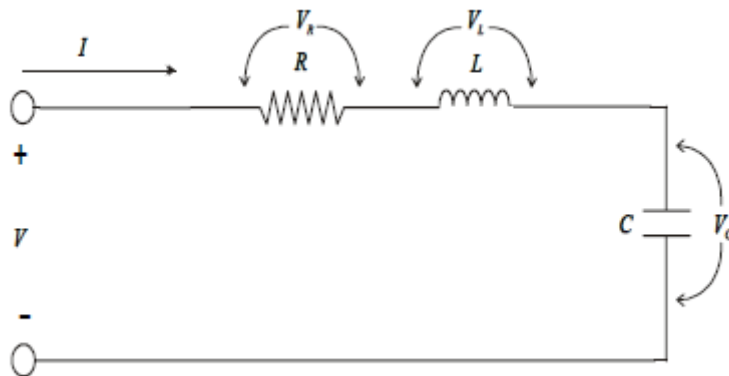
## 2.2 Factor de carga descargado

En este apartado se explica el factor de calidad descargado, también conocido como  $Q_0$ . Este parámetro es muy importante al diseñar filtros de microondas, ya que cuanto más grande sea esta variable, más pequeña es la pérdida de inserción y hace que el filtro sea más selectivo. La resistencia  $R$  en los circuitos representa la pérdida de los resonadores.

El resonador, como ya se ha comentado, es un elemento esencial para el diseño de otros dispositivos. Para frecuencias de microondas, es decir, las frecuencias comprendidas entre 300 MHz y 30 GHz, los resonadores no se pueden implementar de manera sencilla mediante inductancias y capacidades de elementos concentrados, sino que se suelen implementar con elementos distribuidos. En cualquier caso, los resonadores en microondas se acercan al comportamiento de los modelos circuitales RLC cuando se encuentran cerca de la zona de resonancia. Por eso se va a realizar ahora un pequeño estudio preliminar de estos circuitos resonantes RLC. La resistencia  $R$  normalmente se usa como la resistencia equivalente parásita asociada a la disipación de potencia en las inductancias y condensadores reales y a la posibilidad de una carga externa resistiva acoplada al resto del circuito.

### 2.2.1 Resonancia en serie

En la Figura 2.1 se muestra un circuito resonante serie de elementos concentrados.



**Fig. 2.1** Circuito resonante en serie

La impedancia de entrada, llamada  $Z_{IN}$ , que presenta el circuito de la Figura 2.1 viene introducida por la siguiente ecuación:

$$Z_{IN} = R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \quad (2.1)$$

La condición de resonancia en el circuito anterior se produce cuando la reactancia inductiva cancela la reactancia capacitiva:

$$j\omega L - j\frac{1}{\omega C} = 0 \quad (2.2)$$

Si aislamos la frecuencia de resonancia  $\omega_0$  de la ecuación 2.2 queda:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

En la resonancia, la impedancia de entrada  $Z_{IN}$  del circuito de la Figura 2.1 es puramente resistiva, ya que la reactancia inductiva anula la reactancia capacitiva:

$$Z_{IN} = R \quad (2.4)$$

Si se conocen la corriente y el voltaje en la entrada del circuito resonante, entonces la potencia compleja suministrada al resonador es la mitad del producto del voltaje y el conjugado de la corriente, por lo que:

$$P_{IN} = \frac{1}{2}VI^* = \frac{1}{2}|I|^2 Z_{IN} = \frac{1}{2}|I|^2 \left( R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C} \right) \quad (2.5)$$

Así que la potencia disipada por la resistencia es:

$$P_R = \frac{1}{2}R|I|^2 \quad (2.6)$$

La energía almacenada en el condensador es:

$$W_C = \frac{1}{2}CV_C^2 \quad (2.7)$$

Y la energía eléctrica media almacenada en el condensador bajo un voltaje es:

$$W_{C_{av}} = \frac{1}{4} C |V_C|^2 = \frac{1}{4} |I|^2 \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.8)$$

La energía media almacenada en la bobina es:

$$W_{L_{av}} = \frac{1}{4} L |I|^2 \quad (2.9)$$

El factor de calidad descargado para el circuito resonante, se define como la relación entre la energía almacenada en el circuito resonante y la pérdida de potencia en el circuito resonante a la frecuencia resonante, de manera que:

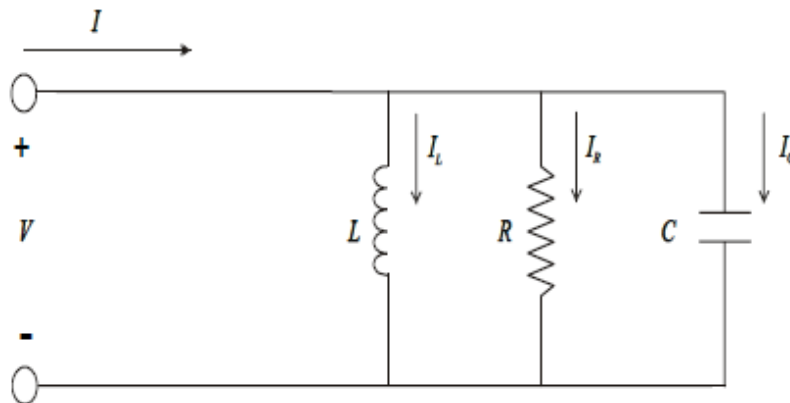
$$Q_O = \omega_O \frac{W_{C_{av}} + W_{L_{av}}}{P_R} \quad (2.10)$$

De esta forma, se puede obtener el factor de calidad descargado para el circuito resonante en serie de la Figura 2.1, y como es resonante  $W_C = W_L$  en la ecuación 2.10 de resonancia se convierte en:

$$Q_O = \frac{\omega_O L}{R} = \frac{1}{\omega_O RC} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 Resonancia en paralelo

En la figura 2.2 se muestra un circuito resonante paralelo de elementos concentrados.



**Fig. 2.2** Circuito resonante en paralelo

La impedancia de entrada  $Z_{IN}$  que presenta el circuito resonante de la Figura 2.2 viene introducida por la siguiente ecuación:

$$Z_{IN} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1} \quad (2.12)$$

Al igual que en el circuito resonante en serie de la Figura 2.1, la condición resonante en el circuito se produce cuando la reactancia inductiva cancela la reactancia capacitiva, por lo que la frecuencia resonante es:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.13)$$

Por lo tanto, cuando se produce la resonancia, la impedancia de entrada de la ecuación 2.12 es puramente resistiva. Ahora la potencia compleja entregada al resonador es:

$$P_{IN} = \frac{1}{2} V I^* = \frac{1}{2} V \left( \frac{V}{Z_{IN}} \right)^* = \frac{1}{2} |V|^2 \left( \frac{1}{Z_{IN}^*} \right) = \frac{1}{2} |V|^2 \left( \frac{1}{R} + \frac{j}{\omega L} - j\omega C \right) \quad (2.14)$$

De esta manera, la potencia disipada por la resistencia es:

$$P_R = \frac{1}{2} \frac{|V|^2}{R} \quad (2.15)$$

La energía eléctrica media almacenada en el condensador es:

$$W_{cav} = \frac{1}{4} |V|^2 C = \frac{1}{4} |I|^2 \frac{1}{\omega^2 C} \quad (2.16)$$

Y la energía magnética media almacenada en el inductor es:

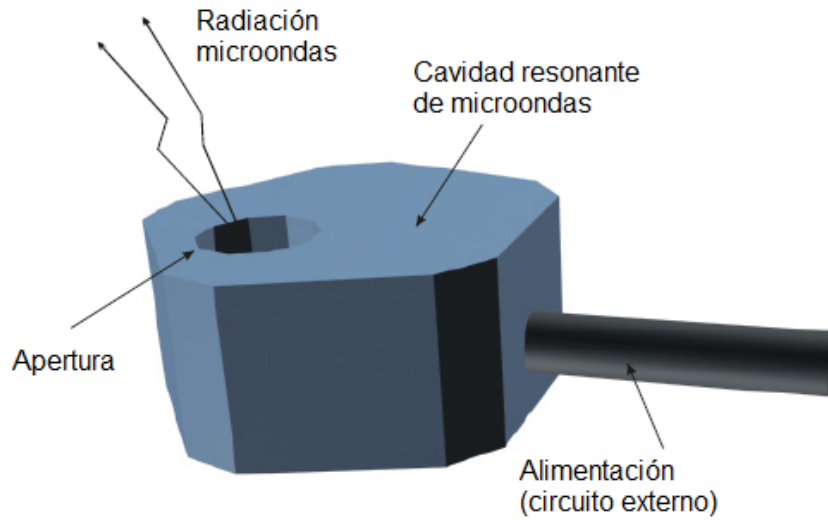
$$W_{L_{av}} = \frac{1}{4} |I_L|^2 L = \frac{1}{4} |V|^2 \frac{1}{\omega^2 L} \quad (2.17)$$

Se puede encontrar el factor de calidad descargado para el circuito resonante paralelo de la Figura 2.2, recordando que al estar en resonancia  $W_C = W_L$ , la ecuación 2.10 se convierte en:

$$Q_o = \frac{R}{\omega_o L} = \omega_o RC \quad (2.18)$$

### 2.3 Extrayendo el factor de calidad

El factor de calidad se define según los términos de la energía almacenada y la energía perdida en la frecuencia de resonancia.



**Fig. 2.3** Cavidad resonante de microondas

Es posible definir tres factores de calidad diferentes para un resonador cargado, dependiendo de qué pérdida se está considerando:

$$Q_l = \omega_o \frac{\text{Energía almacenada en el circuito resonante}}{\text{Pérdida total de potencia}} \quad (2.19)$$

$$Q_o = \omega_o \frac{\text{Energía almacenada en el circuito resonante}}{\text{Pérdida de potencia en el circuito resonante}} \quad (2.20)$$

$$Q_e = \omega_o \frac{\text{Energía almacenada en el circuito resonante}}{\text{Pérdida de potencia en el circuito externo}} \quad (2.21)$$



Las tres expresiones introducidas en las ecuaciones 2.19, 2.20 y 2.21 se evalúan en la frecuencia de resonancia.

El factor de calidad de carga  $Q_l$  depende del acoplamiento entre el circuito resonante y el circuito externo.

El factor de calidad descargado  $Q_o$  es una medida de las pérdidas del circuito resonante; una menor pérdida implica un mayor  $Q_o$ .

El factor de calidad externo  $Q_e$  está relacionado con el grado en que el circuito resonante está acoplado a los circuitos externos.

Los tres factores de calidad se relacionan de la siguiente manera:

$$\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_o} \quad (2.22)$$

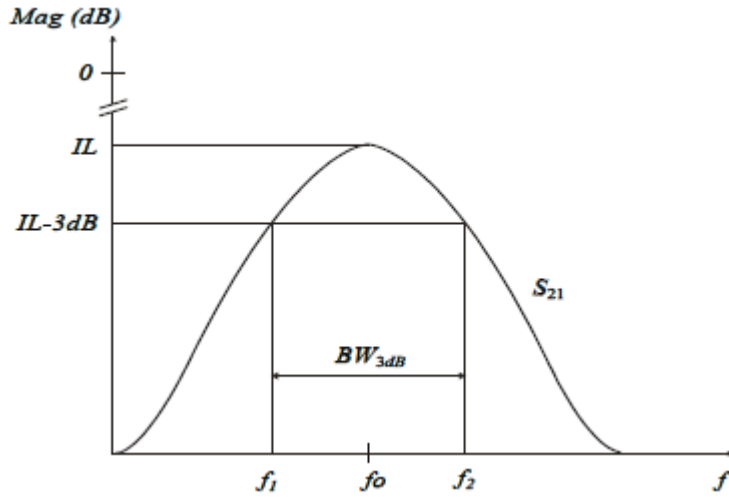
Al diseñar un resonador con líneas de transmisión, es posible que parte de la potencia no esté disponible en la carga, que no fue causada por las pérdidas del material, o por una discrepancia de impedancia en los puertos del dispositivo, es decir, desadaptación de impedancias. Esta potencia puede perderse como resultado de las pérdidas de radiación.

Las pérdidas de radiación dependen principalmente de la estructura física de la línea de transmisión. Cuando la línea de transmisión utiliza semiconductores, se deben tener en cuenta las pérdidas por fugas. Las pérdidas por fugas normalmente están presentes en dieléctricos que tienen resistividad finita, como el caso de los semiconductores.

Las pérdidas presentes en el circuito resonante pueden ser pérdidas de conductores  $Q_c$ , pérdidas dieléctricas  $Q_d$  o pérdidas de radiación  $Q_r$ . El factor de calidad descargado  $Q_o$  para un circuito resonante se puede calcular sumando estas pérdidas, lo que resulta en:

$$\frac{1}{Q_o} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} \quad (2.23)$$

A continuación, se describe un método práctico para extraer el factor de calidad descargado de las mediciones de un resonador cargado. Primero, se considera un resonador cargado simétricamente. La respuesta en frecuencia típica del resonador se muestra en la Figura 2.4.



**Fig. 2.4** Respuesta frecuencial de un resonador

La Figura 2.4 muestra la magnitud del parámetro  $S_{21}$  teórico de un resonador. Este parámetro viene representado, normalmente, en dB. Directamente a partir de la medición el factor de calidad cargado viene dado por:

$$Q_l = \frac{f_o}{BW_{-3db}} = \frac{f_o}{f_2 - f_1} \quad (2.24)$$

Donde  $BW_{-3dB}$  es el ancho de banda tomado en -3 dB como se ilustra en la Figura 2.4.

Ahora el factor de calidad descargado puede ser extraído por:

$$Q_o = \frac{Q_l}{1 - |S_{21}|} \quad (2.25)$$

Donde  $|S_{21}|$  es la magnitud absoluta de  $S_{21}$  a la frecuencia de resonancia  $f_o$ :

$$|S_{21}| = 10^{\frac{IL}{20}} \quad (2.26)$$

Se desea acoplar débilmente el resonador al circuito externo para obtener unas pérdidas de inserción más pequeñas que -20 dB. De esta manera:

$$Q_o = \frac{Q_l}{1 - |S_{21}|} \approx \frac{Q_l}{1 - 0} \approx Q_l \quad (2.27)$$

## **2.4 Herramientas para el análisis full-wave**

Para obtener el diseño en microondas a partir del modelo circuital, hay que resolver las ecuaciones de Maxwell en el interior de la estructura en guía de onda. El objetivo del diseño es conseguir que la respuesta obtenida al resolver las ecuaciones de Maxwell sea semejante al objetivo marcado por el modelo circuital. La resolución de las ecuaciones de Maxwell en la estructura es lo que se denomina análisis *full-wave* o de onda completa.

El análisis full-wave se obtiene mediante diversos software o herramientas. En este proyecto se utiliza HFSS.

HFSS se basa en el método de elementos finitos, es decir, malla la estructura en tetraedros y calcula el valor de los campos electromagnéticos en los vértices del mismo. Dependiendo del mallado, los resultados serán más o menos precisos. Es un software comercial ampliamente usado en la industria.

## **2.5 Guías de onda**

Como se ha comentado anteriormente, un resonador a altas frecuencias puede formarse con guías de onda.

Una guía de onda consiste en un recinto de sección transversal diversa, por ejemplo, puede ser cuadrada, circular, elíptica o de otras formas. Este recinto está relleno de aire o de un material dieléctrico, cuyas paredes son de un material conductor de grosor suficiente para soportar las corrientes y se utilizan para transportar una onda de un punto a otro que viaja confinada en la estructura.

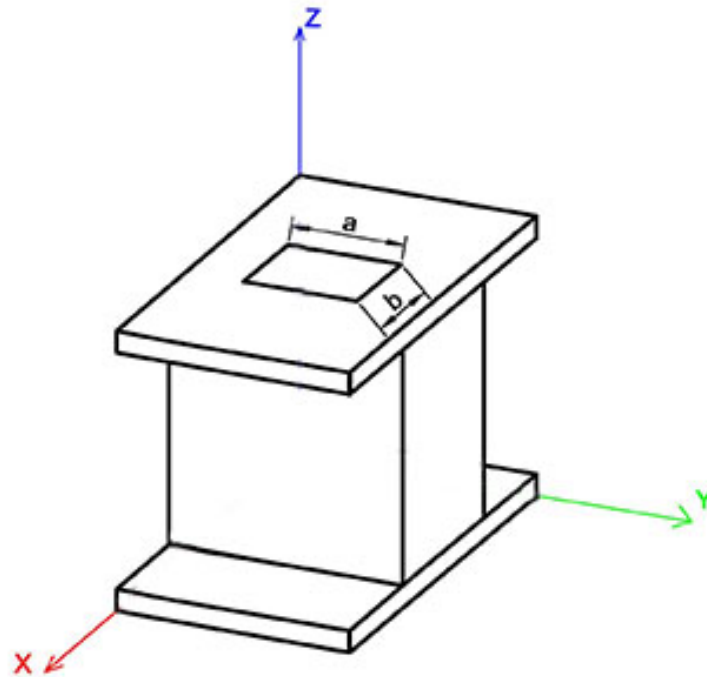
### **2.5.1 Guía de onda rectangular**

La guía de onda rectangular es la tecnología especificada para el diseño del resonador en este proyecto.

Se elige la guía de onda rectangular porque la frecuencia a la que van a operar los dispositivos que se van a diseñar, donde para tener bajas pérdidas y transportar altas potencias se necesitan este tipo de estructuras metálicas de guiado. Pero la principal causa por la que se va a utilizar la rectangular respecto de las otras es la facilidad de fabricación, ya que es una estructura más sencilla de manipular.

La guía de onda rectangular fue uno de los primeros tipos de líneas de transmisión usadas para transportar señales en microondas. Hoy en día sigue siendo utilizada por numerosas aplicaciones. Esto se debe a que hay sistemas

que requieren alta potencia, longitudes de onda milimétricas u aplicaciones con alta precisión que no se podrían realizar con líneas de transmisión más simples de construir y menos voluminosas, como son microstrip, stripline y otras, debido a sus altas pérdidas y su limitada capacidad para llevar señales de alta potencia.



**Fig. 2.5** Esquema general de una guía de onda rectangular

Como se ha comentado anteriormente, en este proyecto solamente se tiene en cuenta las guías de ondas de sección rectangular, ya que son más fáciles a la hora de diseñar y, posteriormente, su impresión 3D.

A partir de este momento, y a lo largo de todo el documento, se toman los ejes de acuerdo a la Figura 2.5. De esta manera, se fijan para todos los diseños de este trabajo:

- Profundidad: longitud de la guía de onda a lo largo del eje X.
- Anchura: longitud de la guía de onda a lo largo del eje Y.
- Altura: longitud de la guía de onda a lo largo del eje Z.

El parámetro principal que determina el rango de frecuencias de diseño es la altura de la cavidad resonante interior de la guía de onda, que varía a lo largo del eje Z. Cabe destacar que es la altura en este eje de coordenadas.

La distribución de los campos en el interior de la guía de onda rectangular se denominan modos y podemos distinguir entre modos TE (Transversal Eléctico)

donde el campo eléctrico no tiene componente en la dirección de propagación y TM (Transversal Magnético) donde el campo magnético no tiene componente en la dirección de propagación.

Para la guía rectangular, el modo  $TE_{1,0}$  es el que tiene menor frecuencia de corte y se suele referir a él como el modo fundamental o dominante. Esto significa que el modo  $TE_{1,0}$  puede propagarse sin atenuación en una guía de ondas rectangular ideal mientras que los demás modos se desvanecen si la frecuencia de operación es mayor que la frecuencia de corte del modo fundamental y menor que la frecuencia de corte del resto de modos

## CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL RESONADOR

### 3.1 Introducción

Este capítulo es el más experimental del proyecto. Se pretende utilizar todos los conocimientos obtenidos para, en primer lugar, diseñar un resonador y simularlo en HFSS. Seguidamente, intentar imprimir este resonador con dos tecnologías de impresión diferentes para compararlas y saber cuál de estas dos tecnologías es más adecuada para futuros proyectos. En último lugar, con las estructuras ya impresas, utilizar dos tipos de procesos para metalizarlas para comprobar su comportamiento en un analizador de redes vectorial, concretamente el ROHDE & SCHWARZ ZVA 24.

### 3.2 Diseño del resonador

En este apartado se explica cómo se diseña el resonador que se quiere obtener.

Como se ha comentado anteriormente, el resonador debe funcionar para la banda de frecuencia  $K_u$ . Esta banda abarca el rango de frecuencias que comprende desde los 12 GHz hasta los 18 GHz. Inicialmente, se calcula la frecuencia central de la banda para adaptar todo el diseño a esta frecuencia.

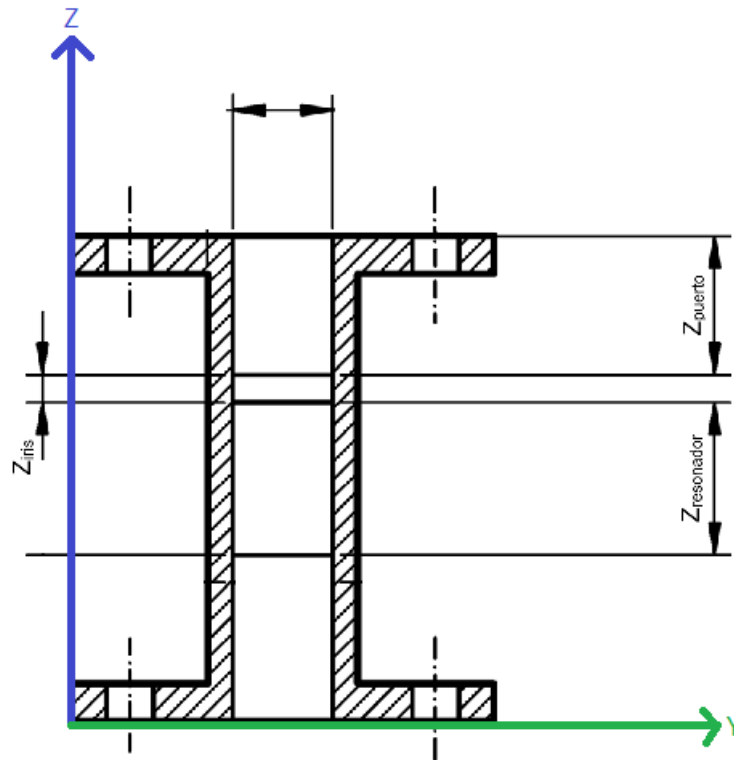
$$f_c = \frac{(12 + 18) \text{ GHz}}{2} = 15 \text{ GHz} \quad (3.1)$$

Para el diseño del resonador se tiene en cuenta la longitud de onda a dicha frecuencia, que se calcula a continuación:

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{15 \cdot 10^9 s^{-1}} = 0,02 \text{ m} = 20 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Cabe destacar que la cavidad resonante tiene que tener la longitud correspondiente a la coordenada Z con un valor de  $\frac{\lambda}{2}$ .

En la Figura 3.1 se muestra el plano 2D con el eje Y y Z, indicando las variables que se van a modificar a lo largo de los siguientes apartados.



**Fig. 3.1** Plano 2D del resonador con las variables

### 3.2.1 Diseño interior

En este apartado se van a diseñar las cavidades interiores, que se representan con cubos de grosor 0.1 milímetros de cobre, rellenos de aire. Más tarde, se procede a cubrir con una estructura todas estas cavidades para dar forma al resonador que se quiere imprimir.

Se escoge la longitud de onda más pequeña, concretamente longitud de onda de 10 milímetros, la correspondiente a  $\frac{\lambda}{2}$  para  $Z_{\text{resonador}}$ . Se crea un cubo con las dimensiones establecidas en la siguiente tabla. Este cubo, representado de color azul en la figura 3.2, forma la principal cavidad resonante del diseño. Las coordenadas  $X_{\text{resonador}}$  e  $Y_{\text{resonador}}$  se escogen teniendo en cuenta las dimensiones del flange comercial escogido, que posteriormente se explica.

**Tabla 4.1** Medidas de las tres coordenadas del resonador

RESONADOR	
Coordenada	Longitud [mm]
X <sub>resonador</sub>	7,8994
Y <sub>resonador</sub>	15,798
Z <sub>resonador</sub>	10

Seguidamente, se crean dos cubos idénticos con las dimensiones indicadas en la Tabla 4.3. Se puede observar que las coordenadas Y y Z son idénticas, pero posteriormente se varían estas medidas para la mejora del diseño, es decir, para que la respuesta sea más selectiva en frecuencia. Estos cubos, representados en verde en la Figura 3.2, forman los iris del resonador. Los iris son pequeñas ranuras que conectan la parte central del resonador con los puertos de salida.

**Tabla 4.2** Medidas de las tres coordenadas de cada iris

IRIS	
Coordenada	Longitud [mm]
X <sub>iris</sub>	7,8994
Y <sub>iris</sub>	5
Z <sub>iris</sub>	5

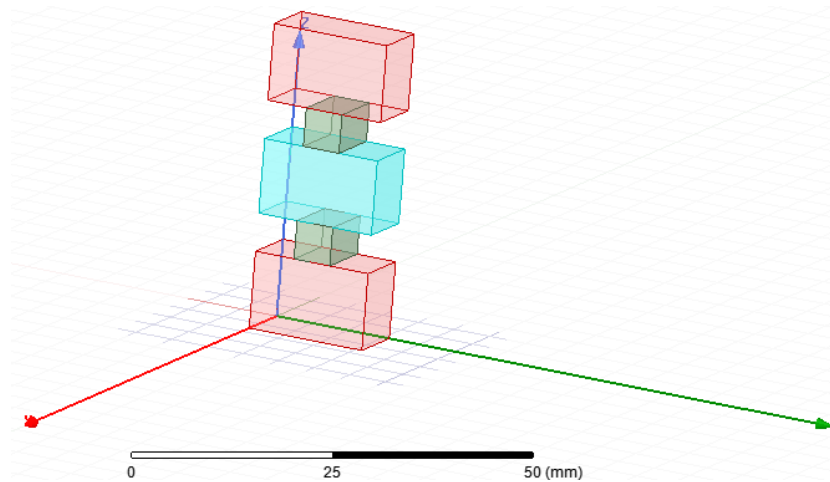
A continuación, se elaboran dos cubos idénticos con las dimensiones señaladas en la Tabla 4.4. Se puede observar que la coordenada Z es aleatoria, ya que posteriormente se modifica para la mejora del diseño. Estos cubos, representados en rojo en la Figura 3.2, forman los puertos del resonador. Para poder ver la respuesta, se tienen que asignar a la cara inferior del primer iris una excitación, y a la cara superior del otro iris otra excitación.

**Taula 4.3** Medidas de las tres coordenadas de cada puerto

PUERTO	
Coordenada	Longitud [mm]
X <sub>puerto</sub>	7,8994
Y <sub>puerto</sub>	15,798
Z <sub>puerto</sub>	10

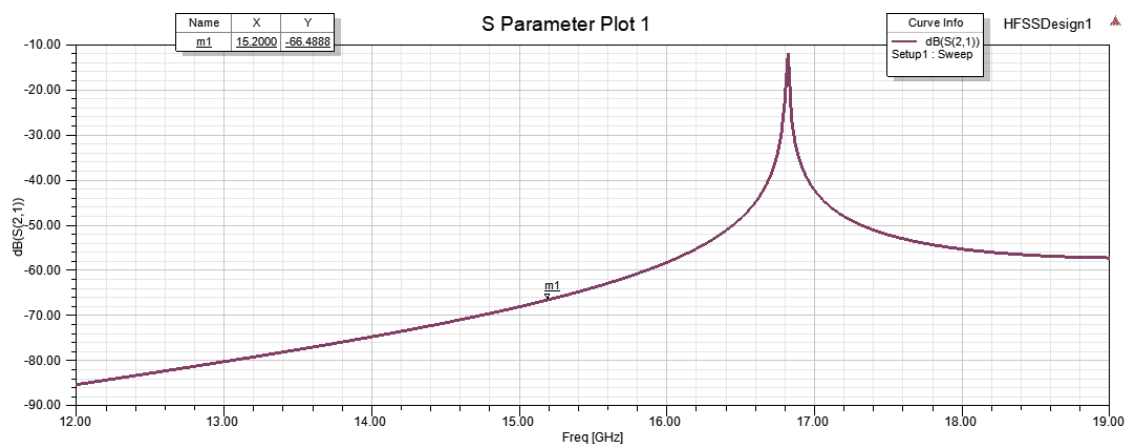
En la Figura 3.2, se puede ver dos piezas verdes que corresponden con los iris y, entre medio de estos dos, un cubo azul que es el resonador. También se muestra uno de los puertos con su correspondiente excitación.





**Fig. 3.2** Diseño del resonador

Finalmente, se obtiene la respuesta del resonador en la Figura 3.3. Este caso puede ser el más cercano para el diseño que se busca.



**Fig. 3.3** Respuesta frecuencial del resonador

### 3.2.2 Variación de las variables

Para hacer que la respuesta frecuencial del resonador se parezca al deseado, es decir, situado aproximadamente a la frecuencia de 15GHz y por debajo de -20 dB, se tiene que proceder a variar las cuatro variables: la altura del iris, la anchura del iris, la altura de los puertos y la altura del resonador. Para ello, se realiza una exhaustiva simulación variando las anteriores variables dentro de los márgenes calculados mostrados en la tabla 15, con una variación de 0.25 mm para encontrar de forma más precisa el valor de las variables que se adapte al diseño deseado.

**Tabla 4.4** Variaciones de las variables del resonador

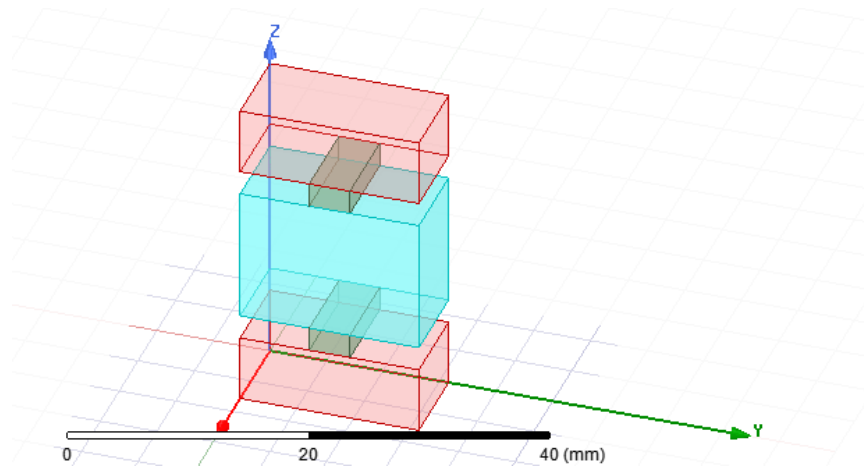
Variable	Mínima longitud [mm]	Máxima longitud [mm]
Z <sub>resonador</sub>	11.8	12.2
Y <sub>iris</sub>	3	4
Z <sub>iris</sub>	2	3
Z <sub>puerto</sub>	5.5	6.5

Según la simulación previa, se encuentran los valores más exactos posibles para el diseño. Estos valores están expresados en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.5** Variables con sus longitudes finales

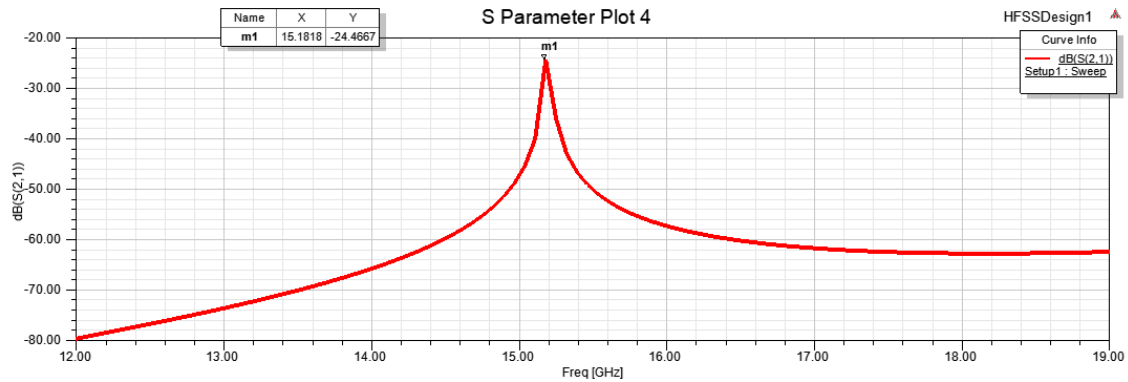
Variable	Longitud [mm]
Z <sub>resonador</sub>	12.1
Y <sub>iris</sub>	3.6
Z <sub>iris</sub>	2.2
Z <sub>puerto</sub>	6

La estructura con las medidas obtenidas en la Tabla 4.8 se muestra en la Figura 3.4.



**Fig. 3.4** Diseño final del resonador

En la Figura 3.5, se puede observar la respuesta final obtenida, después de ajustar todas las dimensiones del resonador. Se consiguen los dos objetivos propuestos, ajustar la frecuencia central lo más cercana a 15.2 GHz y, que esté por debajo -20 dB ya que, como se ha demostrado anteriormente, pues así las pérdidas de inserción serán adecuadas para poder aproximar el factor de calidad descargado al factor de calidad cargado, es decir,  $Q_o \approx Q_l$ .



**Fig. 3.5** Respuesta frecuencial final del resonador

### 3.2.3 Diseño exterior

Se sigue con el diseño de la zona exterior e interior del resonador, teniendo en cuenta que al añadir superficies de metal, podrían aparecer pequeñas variaciones en la respuesta.

Se diseña una tapa de metal, que se coloca encima y debajo del resonador. Estas tapas se diseñan teniendo en cuenta los flanges comerciales existentes en el mercado. Como se ha comentado en los apartados anteriores, para la banda de frecuencia  $K_u$ , que comprende el rango de frecuencias de 12 a 18 GHz, se escoge el flange comercial WR62 [8]. Se puede ver el plano en la Figura 3.6 con sus respectivas medidas.

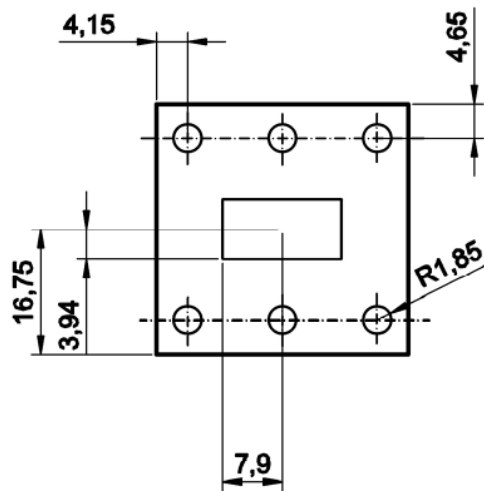


Fig. 3.4 Plano del WR62

En la Figura 3.7 se colocan los dos rectángulos azules que formaran los flanges. Estos flanges sirven para medir el funcionamiento del resonador.

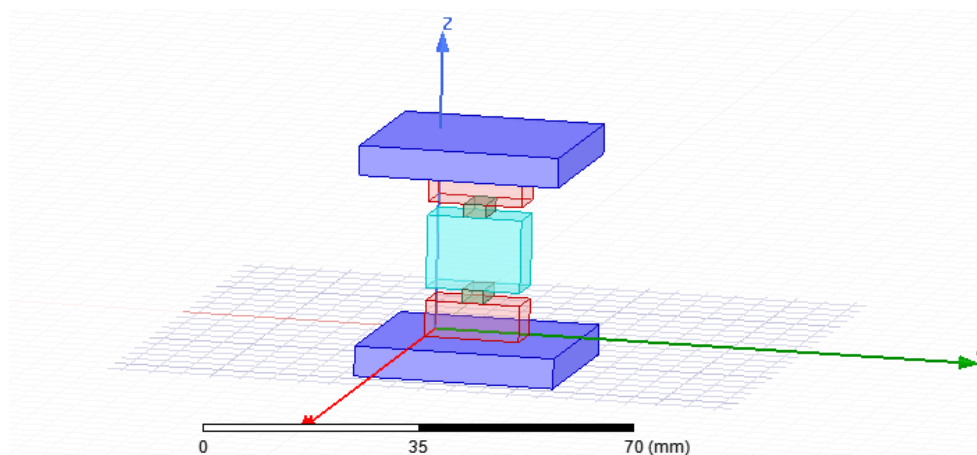
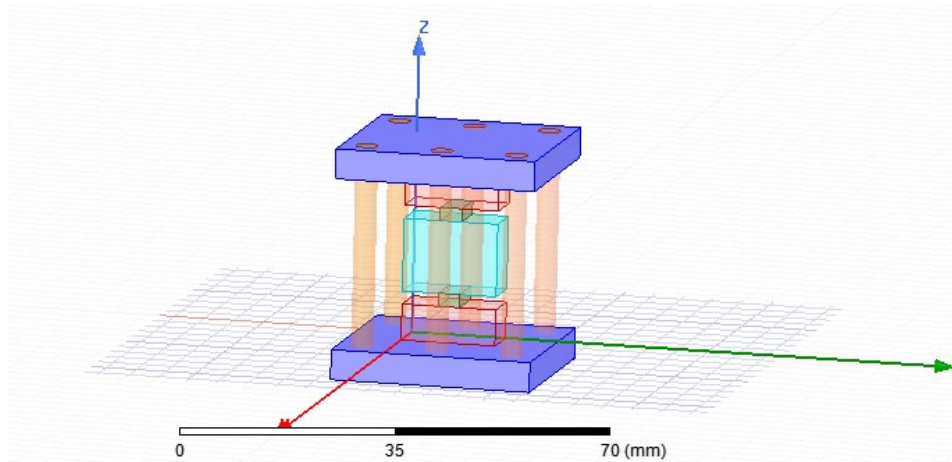


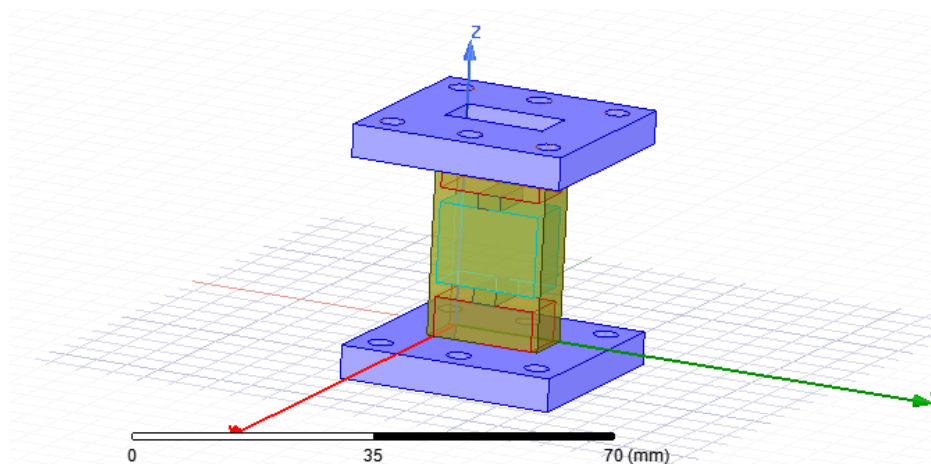
Fig. 3.5 Cavity resonante y los flanges

Seguidamente, se realizan los 6 cilindros que, después de restarlos a las tapas, serán los 6 huecos para los tornillos del flange. Estos tornillos se necesitan para sujetar el flange de cara a la medición final del dispositivo con el analizador de redes vectorial.



**Fig. 3.8** Cavity resonante con el flange y los cilindros para permitir ensamblar el flange comercial

Para finalizar el diseño del resonador, se construye un rectángulo de metal que cubre las cavidades aire ya diseñadas, donde las ondas van reflejadas y, se realizan las dos aperturas de los flanges, tanto arriba como abajo. En la Figura 3.8 se puede observar el diseño final del resonador para la banda  $K_u$ .

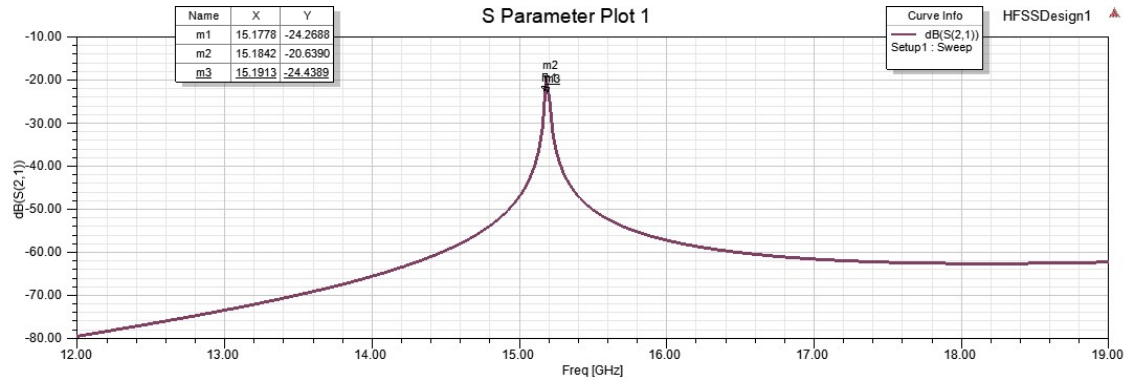


**Fig. 3.9** Diseño final del resonador con los flanges comerciales WR62

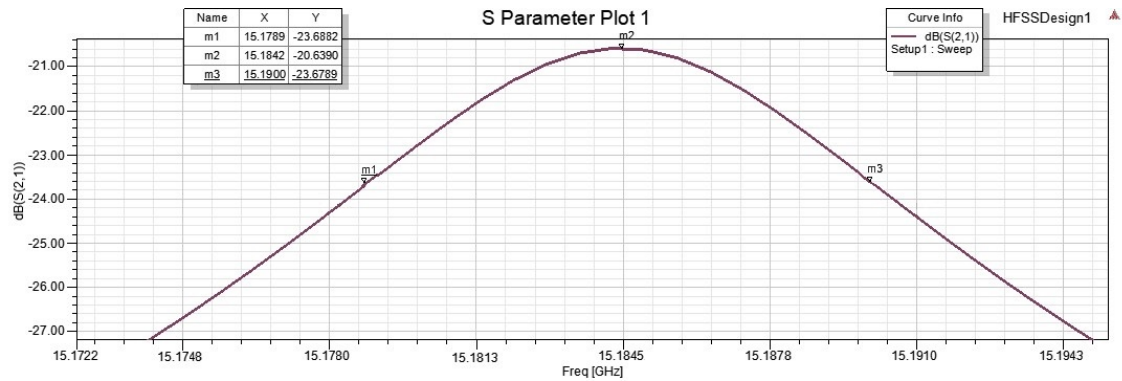
### 3.2.3.1 Simulación con cobre

En este apartado se ha escogido el cobre como metal para el diseño del resonador.

Como se puede apreciar en la Figura 3.10, la respuesta de los parámetros S del resonador finalizado se aproxima a la obtenida previamente, la que no tenía ni tapa ni la caja metálica.



**Fig. 3.6** Respuesta frecuencial final del resonador de cobre



**Fig. 3.71** Respuesta frecuencial final del resonador de cobre ampliada

De esta manera, procedemos a calcular en primer lugar el factor de calidad cargado:

$$Q_l = \frac{f_o}{BW_{-3db}} = \frac{f_o}{f_2 - f_1} = \frac{15,1842 \text{ GHz}}{(15,1900 - 15,1789) \text{ GHz}} = 1368 \quad (3.3)$$

Seguidamente, se extrae las pérdidas por inserción obtenidas de la gráfica de la Figura 3.11:

$$|S_{21}| = 10^{\frac{IL}{20}} = 10^{\frac{-20,639}{20}} = 0,093 \quad (3.4)$$

Finalmente, se obtiene el factor de carga descargado:

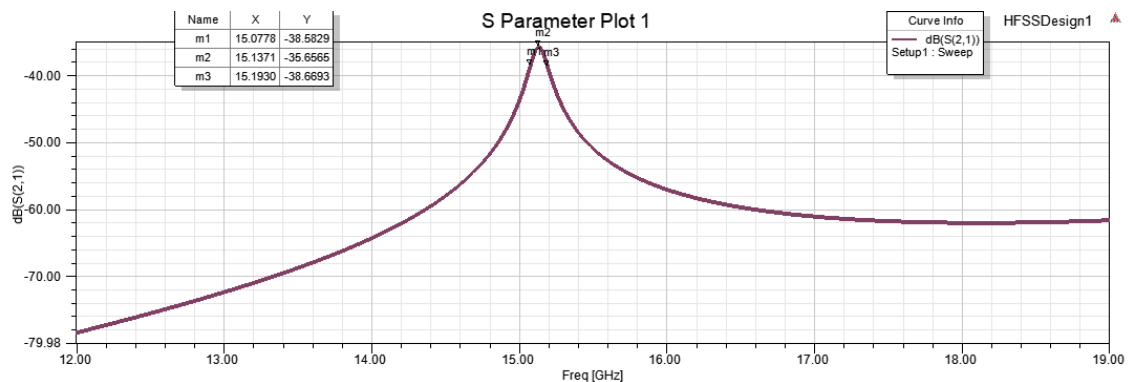
$$Q_o = \frac{Q_l}{1 - |S_{21}|} = \frac{1368}{1 - 0,093} = 1508 \quad (3.5)$$

**Tabla 4.6** Caracterización del resonador simulado en cobre

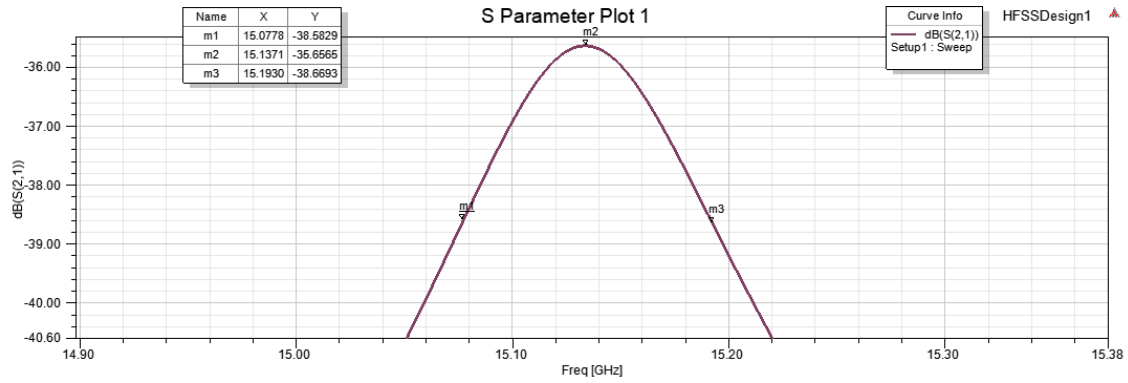
Características	Simulación
$f_o$ [GHz]	15,1842
$Q_l$	1368
$BW_{-3dB}$ [MHz]	11,1
$ S_{21} $	0,093
$Q_o$	1508

### 3.2.3.2 Simulación con níquel

Se repite el mismo procedimiento del apartado anterior y se asigna que los metales sean esta vez de níquel.



**Fig. 3.82** Respuesta frecuencial final del resonador de níquel



**Fig. 3.93** Respuesta frecuencial final del resonador de níquel ampliada

Como se ha hecho anteriormente, se calcula el factor de calidad cargado:

$$Q_l = \frac{f_o}{BW_{3db}} = \frac{f_o}{f_2 - f_1} = \frac{15,1371 \text{ GHz}}{(15,1930 - 15,0778) \text{ GHz}} = 131,4 \quad (3.6)$$

Se extraen las pérdidas de inserción:

$$|S_{21}| = 10^{\frac{IL}{20}} = 10^{\frac{-35,65}{20}} = 0,0165 \quad (3.7)$$

En último lugar, se obtiene el factor de calidad descargado:

$$Q_o = \frac{Q_l}{1 - |S_{21}|} = \frac{131,4}{1 - 0,0165} = 133,6 \quad (3.8)$$

**Tabla 4.7** Caracterización del resonador simulado en níquel

Características	Simulación
$f_o$ [GHz]	15,1371
$Q_l$	131,4
$BW_{-3dB}$ [MHz]	115,2
$ S_{21} $	0,0165
$Q_o$	133,6

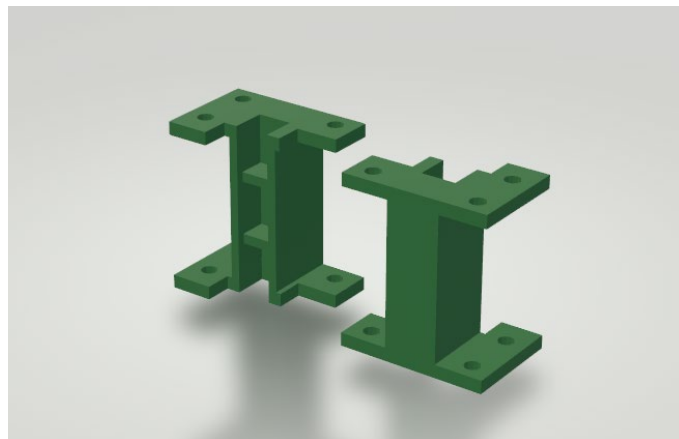


Cabe destacar que las pérdidas de inserción que presenta el resonador simulado con níquel son mucho más elevadas que las presentadas por el resonador de cobre. Es por ello que el resonador de cobre tiene un factor de calidad mucho mejor ya que la respuesta es mucho más selectiva en frecuencia, es decir, el  $BW_{-3dB}$  es mucho más pequeño en el resonador de cobre que en el de níquel. Esto es porque el cobre tiene mayor conductividad que el níquel.

### 3.3 Impresión 3D

Una vez se obtiene el diseño final del resonador en HFSS, se guarda el diseño como un archivo .stl para, más tarde, poder ejecutar este diseño en el software de la impresora 3D. El stl es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora, que define geometría de objetos 3D. Es el formato estándar para las tecnologías de fabricación aditiva. Utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma de un objeto. La resolución del fichero aumenta si los triángulos son más pequeños.

Antes de comenzar, se adapta el resonador para su impresión. Para ello, se realiza una división en el plano H, es decir, del campo magnético, para obtener dos piezas idénticas que conformaran el resonador. Este corte se realiza en el plano H, ya que, las pérdidas son menores que si se hiciera en el plano eléctrico, es decir, el plano E. Las dos piezas resultantes se muestran a continuación, en la Figura 3.14.



**Fig. 3.10** Resonador dividido por el plano magnético

En los apartados siguientes se puede observar los principales tipos de impresoras 3D existentes en el mercado.

### 3.3.1 Tipos de impresoras 3D

Las impresoras 3D toman un modelo 3D de un objeto, lo cortan en muchas capas finas y bidimensionales y, es entonces, cuando imprimen una capa sobre otra para formar el objeto tridimensional. Existen tres tecnologías base de impresión 3D:

Modelado por deposición fundida, también conocido por FDM, siglas provenientes del inglés “Fused Deposition Modeling”. Se trata de impresoras de plásticos. Funden el material y lo van depositando. Se utilizan para prototipos, siempre que no se necesite validar propiedades mecánicas.

Sinterización selectiva por láser, también conocida por SLS, siglas provenientes del inglés “Selective Laser Sintering”. Se trata de impresoras de polvo. Emplea un láser para fundir las partículas de polvo entre ellas. Se utilizan para prototipos en empresas y maquetas en arquitectura, gracias a su resistencia mecánica.

Estereolitografía o foto solidificación, también conocida por SLA, siglas provenientes del inglés “Stereolithography Apparatus”. Se trata de impresoras de resina. Estas impresoras usan un rayo láser para solidificar la resina líquida. Se suelen usar para maquetas, joyería y en el ámbito dental, gracias a su velocidad de impresión y su gran detalle. Existe una variante que es el DLP, siglas provenientes del inglés “Digital Light Processing”. Tiene un funcionamiento similar pero, en vez de usar un láser, usa un proyector. Este proyecta la imagen para solidificar toda la capa de golpe.

En este proyecto, se decide realizar dos pruebas. Primero, se imprime un resonador con una impresora DLP, ya que es la impresora de que se dispone en el CTTC. La segunda prueba basada en la tecnología FDM, se realiza en la Universidad de La Coruña, en la EUDI, en el campus de Ferrol.

### 3.3.2 Impresión DLP

En este caso, como se ha comentado anteriormente, se emplea la MONO2 3D [9], una impresora 3D de resina por método DLP.

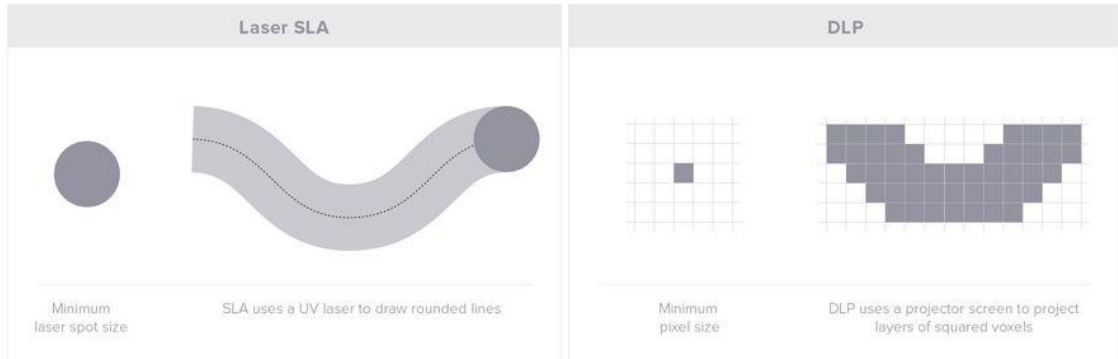


**Fig. 3.15** Fotografía del laboratorio de impresión 3D

En primer lugar, se debe calibrar la impresora, ya que si no está bien configurada, las piezas pueden salir mal. Para ello, mediante el software MonoWare [10], se procede a calibrarla, configurar ciertos parámetros como son la resolución del proyector, la altura inicial de la tapa y el paso de rosca en el eje Z y, antes de nada, hacer una impresión de prueba para ver su correcta calibración. A continuación, se vierte la resina fotosensible en el recipiente para que se endurezca al recibir los rayos ultravioletas procedentes del proyector al plasmar sobre la resina la imagen de esa capa en concreto. Solo se endurece donde incide luz ultravioleta, las otras partes se quedan en negro. Concretamente, se usa “SF Green Resin” [11], de la marca comercial MakerJuice. La base del objeto será la primera capa a imprimir y, a partir de ahí, la plataforma donde se construye la figura se va separando del contenedor que contiene la resina para proceder a solidificar las diferentes capas restantes.

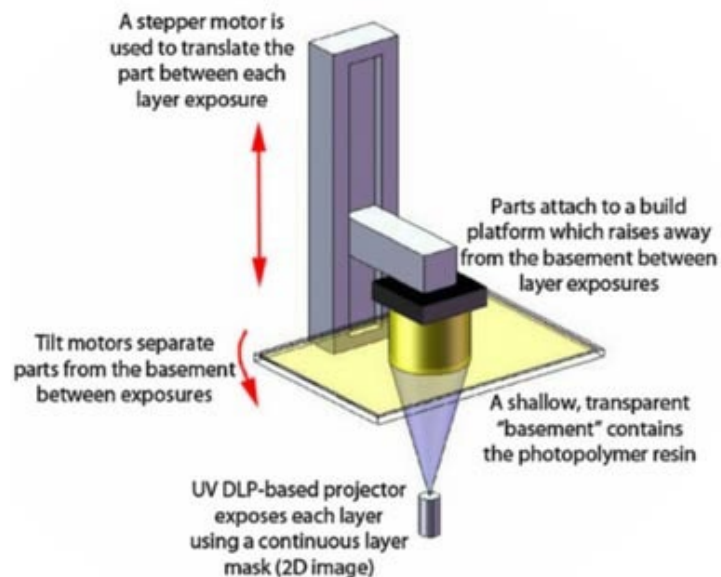
Se ha usado esta tecnología de impresión ya que tiene un gran acabado, con una gran precisión que ofrece un nivel de detalle muy alto. Además, ha tardado en imprimir el resonador aproximadamente unos 40 minutos, debido a que imprime capa por capa. Este es uno de los motivos por el cual se usa el DLP en vez de la SLS.

A pesar de ello, la calidad es elevada, aunque podría ser mejor con la SLS, ya que al usar el proyector, sus píxeles son cuadrados y el SLS usa puntos. A continuación se facilita el trazado de ambas tecnologías de impresión.



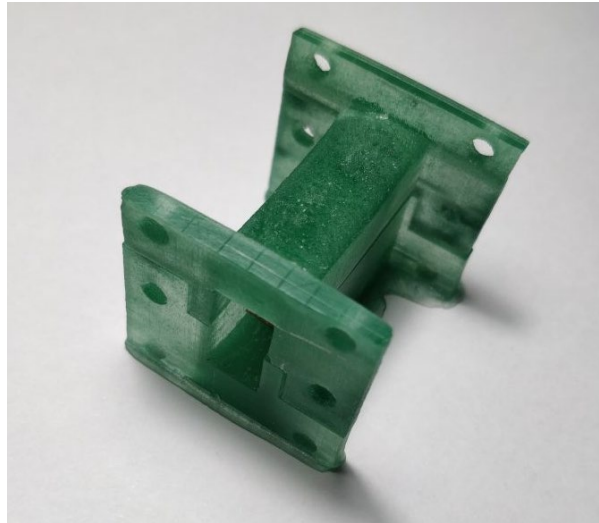
**Fig. 3.16** Trazado de impresión de impresora SLA y DLP

El post procesado es tedioso, ya que hay que quitar los restos de resinas que no forman parte de la estructura y, a la vez, tener cuidado ya que el material puede ser nocivo para las personas si se manipula sin protección, por lo que se necesita el uso de guantes.



**Fig. 3.17** Funcionamiento de impresora DLP

En la Figura 3.18 se muestra la imagen del resonador impreso.



**Fig. 3.18** Resonador impreso 3D con resina mediante la tecnología DLP

### 3.3.3 Impresión FDM

La tecnología por modelado de deposición fundida es el método existente de impresión 3D más sencillo.

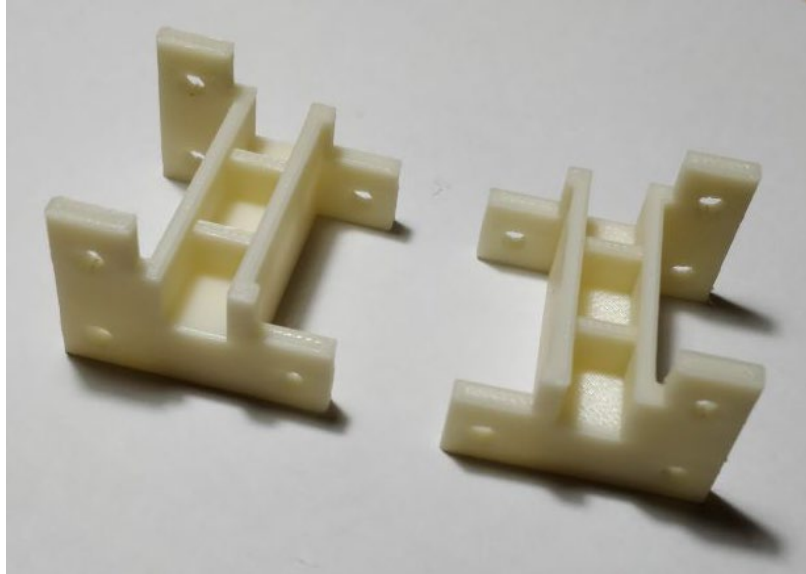
Este método se basa en tres elementos principales: una placa o cama de impresión en la que se imprime la pieza, una bobina de filamento que sirve como material de impresión y una cabeza de extrusión llamada extrusor.

El filamento termoplástico se calienta y se extruye en las coordenadas X e Y a través del cabezal de extrusión. El material se deposita capa por capa de forma muy precisa sobre la cama de impresión, que va bajando hacia abajo en el eje Z.

En resumen, el filamento es succionado y fundido por el extrusor de la impresora 3D, que deposita el material de forma precisa capa por capa sobre la cama de impresión.

Se utiliza también este método de impresión ya que se necesitaba imprimir otra figura con el material crilonitrilo butadieno estireno, también conocido por ABS. Este material es más resistente pero no es este el motivo por el cual se va a usar. Este material acepta la galvanoplastia, la técnica de cubrir superficies con minúsculas capas de metal mediante la electrólisis.

En la Figura 3.19 se puede observar el resultado de la impresión por FDM, apreciando un acabado mucho más rugoso que el impreso mediante DLP con resinas, ya que este último imprime de manera uniforme y, la impresión por FDM se imprime por zonas a medida que el extrusor se va moviendo.



**Fig. 3.19** Resonador impreso 3D con ABS mediante la tecnología FDM

### 3.3.4 Comparación

Aquí se comparan las dos figuras impresas por los dos métodos propuestos.

**Tabla 4.8** Comparación entre las dos tecnologías de impresión usadas

Características	FDM	DLP
Nivel de uso	Sencillo	Complejo
Calidad	Media - Baja ( Depende de la boquilla del extrusor )	Elevada
Precio material	16 € / 1 kg	70 € / kg
Precio impresora	Desde 200 €	Desde 1000 €
Resistencia	Baja, sobretodo eje vertical	Elevada, no se deforma
Tiempo de impresión	2 horas	45 minutos
Post procesado	No necesita	Baño en alcohol
Peso	20 gramos	18.5 gramos
Acabado	Rugoso	Muy Liso
Materiales	ABS	Resina

Cabe destacar que en este proyecto la característica más importante es la metalización, ya que de ello depende que el resonador funcione o no. Además, por este motivo, la figura impresa por el método de FDM es más adecuada para este proyecto, a pesar que el acabado tiene peor calidad y es más rugoso que el impreso por DLP.

### **3.4 Metalización**

Una vez se obtienen las figuras 3D, es el momento de dar un paso más de cara al objetivo final. Para comprobar el funcionamiento del resonador se tiene que metalizar, ya que sin una minúscula capa de metal las ondas no podrán avanzar por el interior de la guía de ondas rectangular y, por lo tanto, experimentalmente no tendría ningún uso.

Se van a plantear dos técnicas de metalización para compararlas y decidir cuál de las dos es mejor para el objetivo final, es decir, hacer mediciones con el resonador y caracterizarlo.

La primera técnica se aplica sobre la figura impresa por DLP y consiste en una cinta adhesiva de cobre que cubrirá la figura.

El segundo procedimiento se aplica sobre la figura impresa por FDM y trata en cubrir la figura con finas capas de metal mediante electrólisis. Este método se llama galvanoplastia. Diferentes proyectos han usado la galvanoplastia [12] para el metalizado de las figuras diseñadas.

Se elige de esta forma ya que queremos probar los diferentes métodos de metalizar y poder compararlos.

#### **3.4.1 Metalización con cinta adhesiva de cobre**

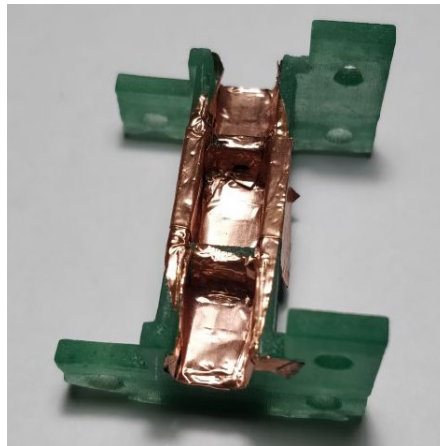
Este proceso es muy sencillo de implementar, no obstante, su principal problema es la efectividad.

El procedimiento se basa en dibujar las medidas de cada cavidad sobre una tira de cobre [13], recortarlas y pegarlas en la estructura. Su inconveniente es que como es un desarrollo casero, las tiras no son perfectas. Además, su complicada manipulación a la hora de pegarlas sobre las cavidades de la figura impresa, aparecen más imperfecciones, ya que suele romperse sobre todo en las esquinas y aparecen muchas arrugas lo que impide el correcto funcionamiento del resonador.

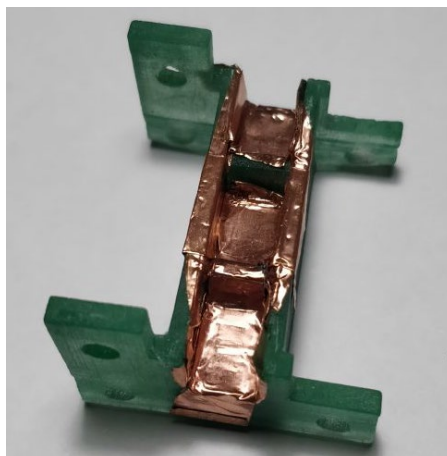


**Fig. 3.11** Cinta adhesiva de cobre

En la Figura 3.21 y en la Figura 3.22 se puede apreciar la poca calidad de este método, ya que la cinta de cobre se arruga y se rompe por todas las esquinas, además de que no se adhiere bien a la figura impresa.



**Fig. 3.12** Mitad del resonador metalizado



**Fig. 3.13** Otra mitad del resonador metalizado



### 3.4.2 Metalización mediante galvanoplastia

Para la metalización de la figura impresa en ABS, se utiliza la técnica de la galvanoplastia, también conocida como electrodeposición.

Este proceso se usa principalmente en situaciones en las que es necesario hacer que el sustrato o la pieza sea eléctricamente conductora o añadir una fina capa de cobre o níquel. Normalmente, este método es usado en metales ya que el recubrimiento de cobre o níquel depende de la electrodeposición de metales para recubrir el sustrato y, por este motivo, es mucho más difícil hacerlo en plásticos ya que no conducen y pocas compañías han sido capaces de dominar la técnica. En este caso, la pieza se ha recubierto con una aleación de níquel, cobre y bronce blanco y amarillo. En la aleación el metal que predomina es el níquel.

Como los plásticos no conducen la electricidad, para que los iones de cobre en el baño se adhieran a la superficie del sustrato y garanticen que la parte esté preparada para el proceso de galvanoplastia, es necesario realizar una serie de complejos pasos como son el moldeo, la limpieza, la inmersión previa, el grabado, la neutralización, la activación y la aceleración.

Una vez que se han completado todos los pasos anteriores del tratamiento previo, la siguiente fase de la galvanoplastia de cobre implica el recubrimiento electrolítico. El proceso de recubrimiento electrolítico deposita una película metálica adherente sobre la superficie de la figura impresa en ABS, lo que lo hace eléctricamente conductor al recubrimiento del plástico.

Una vez que se ha aplicado el recubrimiento de cobre, la pieza impresa de plástico ahora está lista para la galvanoplastia. El revestimiento de cobre sobre plástico se realiza esencialmente de la misma manera que cuando se coloca sobre superficies metálicas.

Primero se configura la estación de enchapado: que requiere un rectificador para proporcionar la corriente continua, una pieza sólida de cobre o ánodo, un cátodo, que en este caso es el plástico, la solución de enchapado y el tanque de enchapado.

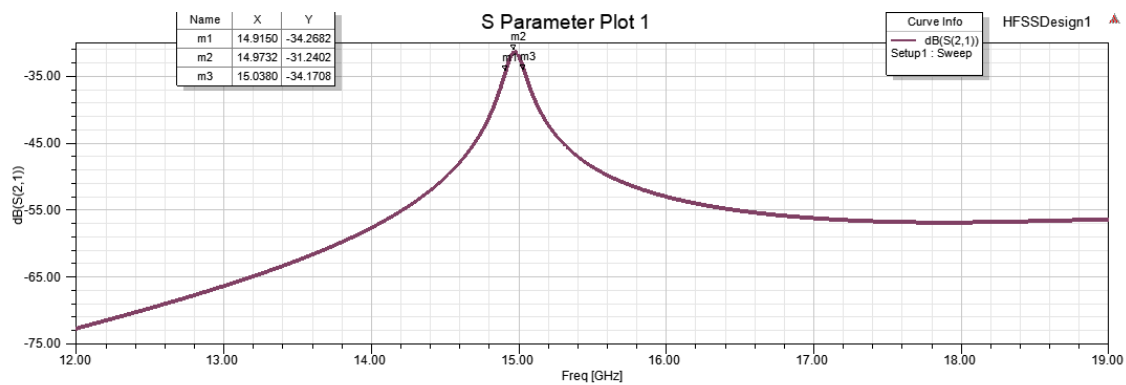
Seguidamente, se acopla el cable negativo del rectificador al sustrato sumergido y se coloca el cable positivo al ánodo de cobre en la solución de recubrimiento. Al encender la corriente continua, provoca la oxidación del ánodo y la formación de iones de cobre, que se reducen en el cátodo. La electrodeposición del metal de los iones de cobre comienza a ocurrir tan pronto como se habilita la corriente eléctrica.

Se puede apreciar que el galvanizado no es perfecto. La metalización presenta diferentes calvas que puede afectar en el funcionamiento del resonador, ya que puede ser que esas partes no sean conductoras. En teoría, las capas de metalizado de níquel son de 10 micras, pero el resultado no ha quedado según lo esperado, ya que presenta bastantes rugosidades donde va cambiando el

grosor a lo largo de toda la estructura. Esto es debido a la mala calidad del galvanizado pero también influye la calidad de impresión de extrusión, ya que al ser filamento extruido, las capas no son del todo uniformes a la hora de impresión ya que deposita el material con una precisión que depende del diámetro del extrusor, por este motivo no queda la superficie totalmente lisa, sino que se puede apreciar curvas.

Para comprobar la calidad de impresión y de la galvanoplastia, se utiliza un pie de rey con el objetivo de medir las medidas exactas correspondientes al resonador ya metalizado.

Con las medidas obtenidas se modifica el archivo HFSS y se vuelve a simular, obteniendo la imagen de la Figura 3.23.



**Fig. 3.14** Simulación del resonador con las medidas obtenidas con el pie de rey

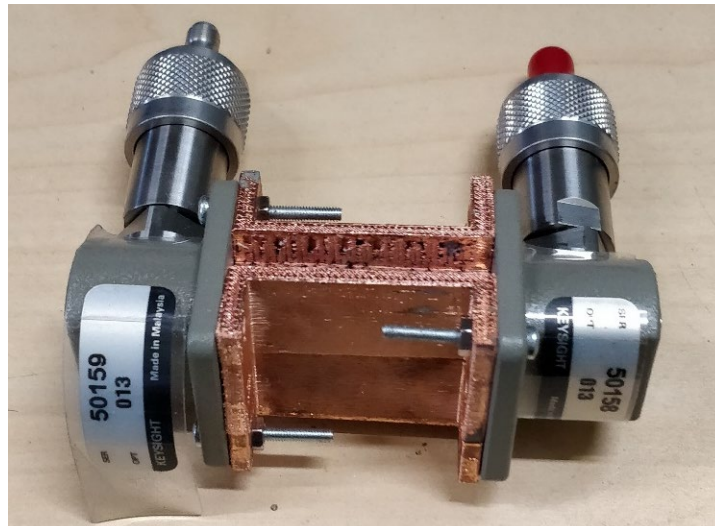
### 3.5 Mediciones del resonador

En el momento de hacer las mediciones, se ha tenido que calibrar el equipo con los adaptadores coaxiales a guía de onda para que cuando mida el plano de medición se sitúe a la entrada coaxial de los adaptadores a guía de onda y, de esta manera, no se consideran las posibles pérdidas introducidas por el coaxial. A pesar de ello, en el resultado que se obtiene al realizar la medición se tiene en cuenta las pérdidas presentadas por los adaptadores y, por lo tanto, influyen en la medición. Para calibrarlo, se conectan diferentes cargas tanto en el puerto uno como en el puerto 2. Estas cargas son circuito abierto, cortocircuito, carga de 50 Ohms y una pieza para interconectar las dos. Estos terminales se pueden ver en la Figura 3.24.



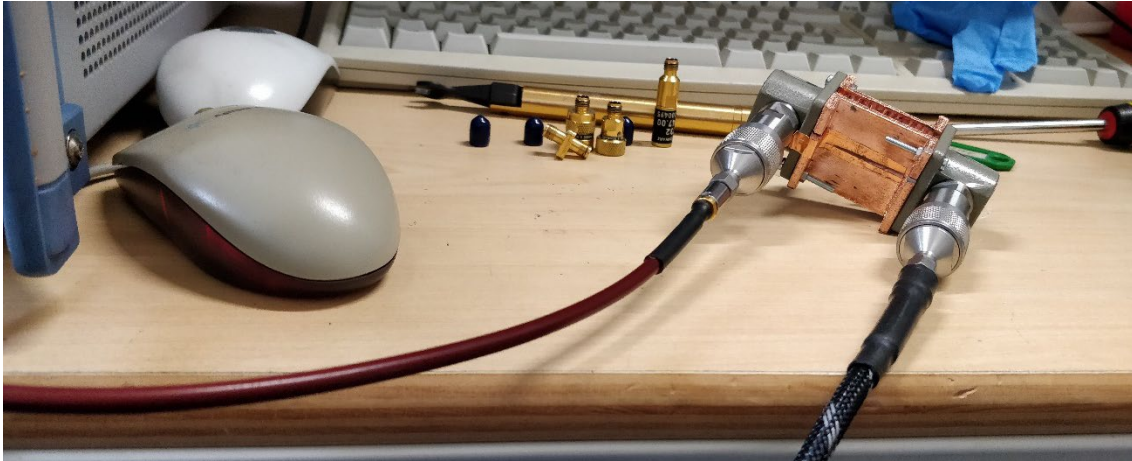
**Fig. 3.15** Kit de calibración

Al terminar, se procede a conectar los adaptadores a ambos flanges comerciales mediante tornillos para obtener las medidas. Se tiene que colocar de manera muy preciosa para centrar bien las ranuras.



**Fig. 3.25** Resonador con los adaptadores

Después de calibrar y ajustar todo bien, se conecta y se configura la pantalla, es decir, se ajusta el rango de frecuencias donde se usa el resonador, más o menos, entre 10 y 22 GHz, para abarcar todo el rango. La imagen obtenida no se asemeja en ningún caso al resonador, ya que no presenta ningún pico de resonancia y, además, aparece a lo largo de todo el rango de frecuencias mucho ruido, por lo que la medición realizada no sirve, ya que es imposible apreciar el comportamiento teórico que se esperaba del resonador. En la siguiente imagen se puede ver el montaje para la medición en el analizador de redes vectorial.



**Fig. 3.26** Montaje de la medición del resonador

A pesar del nulo funcionamiento del resonador, existe una posibilidad para intentar que esas calvas sin metalización pudieran conducir. Se utiliza una pasta conductora de plata, que contiene metales conductores, para cubrir las pequeñas calvas existentes en el interior de la cavidad resonante. Una vez se cubren y se distribuye bien la pasta conductora de plata, se tiene que secar en un horno a unos  $160^\circ$  para su correcto curado y, posteriormente, su correcto funcionamiento como conductor. La gran ventaja de usar el material ABS para la impresión de la figura 3D fue que soporta temperaturas muy elevadas hasta su fusión, por lo que la estructura resiste la temperatura de curado.

Posteriormente, se vuelve a calibrar el analizador de redes vectorial para la simulación del resonador. Se conecta la sonda al puerto uno del analizador y al puerto uno del resonador y lo mismo en el otro puerto.

En la Figura 3.27 se observa una gráfica de Excel, se muestra de manera más clara y precisa el parámetro  $S_{21}$ , que se han extraídos directamente del analizador mediante un USB.

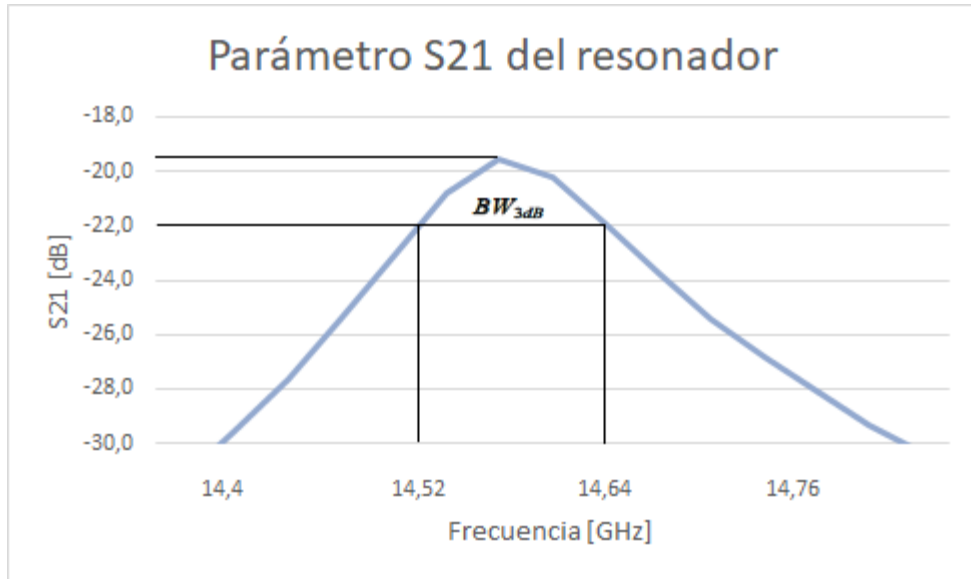


**Fig. 3.16** Gráfica del parámetro S21 obtenido a partir del analizador

Como se puede apreciar en la figura 4.32, el pico de resonancia se ha desplazado hacia la izquierda, es decir, ha pasado de estar en 15,13 GHz a estar rondando los 14,6 GHz. En la siguiente tabla se observa las tres frecuencias más importantes del resonador, que son el pico de resonancia y las frecuencias que están 3 dB por debajo de esta.

**Tabla 4.9** Frecuencias importantes con su parámetro S21

Frecuencia [GHz]	S21 [dB]
14,52	-22,55
14,58	-19,6
14,64	-22,54



**Fig. 3.2817** Gráfica del parámetro S21 y BW<sub>-3dB</sub>

De esta manera, procedemos a calcular en primer lugar el factor de calidad cargado:

$$Q_l = \frac{f_o}{BW_{-3db}} = \frac{f_o}{f_2 - f_1} = \frac{14,58 \text{ GHz}}{(14,64 - 14,52) \text{ GHz}} = 121,5 \quad (3.9)$$

Seguidamente, se extrae las pérdidas por inserción obtenidas de la gráfica anterior:

$$|S_{21}| = 10^{\frac{IL}{20}} = 10^{\frac{-19,586}{20}} = 0,104 \quad (3.10)$$

Finalmente, se obtiene el factor de carga descargado:

$$Q_o = \frac{Q_l}{1 - |S_{21}|} = \frac{121,5}{1 - 0,104} = 135,74 \quad (3.11)$$

Como se puede observar, el pico de resonancia se ha desplazado de la frecuencia 15,13 GHz hasta la frecuencia de 14,58 GHz.

Cabe destacar que las pérdidas de inserción no son demasiado altas ya que se sitúan alrededor de los -20 dB y, a su vez, el factor de carga es muchísimo más pequeño, ya que el BW<sub>-3dB</sub> es bastante elevado en comparación al obtenido en el cálculo teórico.

**Tabla 4.10** Características del resonador en la simulación y en la medición

	Simulación	Medición
$f_o$ [GHz]	15,13	14,58
$Q_l$	131,4	121,5
$ S_{21} $	0,0165	0,104
$Q_o$	133,6	135,74

## CAPÍTULO 4. Conclusiones

Se concluye este proyecto con los objetivos iniciales completados, ya que se ha obtenido un buen nivel de uso del software HFSS, se ha repasado y profundizado en la teoría de microondas y resonadores. Además, se han adquirido conocimientos de impresión 3D que han permitido imprimir ambas figuras con las diferentes tecnologías. Pese a la dificultad de la metalización, que parecía que no iba a ser posible, se ha conseguido metalizar y medir en el analizador de redes vectorial, para hacer una comparación teórica y real desde el diseño a la implementación de un componente de un sistema de telecomunicaciones.

A pesar de cumplir todos los objetivos, no se ha obtenido un buen resultado a la hora de hacer las mediciones. El motivo por el cual no se obtiene un buen resultado en las simulaciones en el analizador vectorial de redes es debido a la posible mala metalización realizada por la galvanoplastia, donde varía el grosor en toda la estructura resonante además de la aleación de varios metales con diferentes propiedades. Este proceso también influye en el desplazamiento del pico de resonancia, ya que las tolerancias de fabricación, tanto en la impresión como en la metalización, hacen que se desvíen los resultados teóricos y experimentales.

Los posibles proyectos para el futuro consisten en mejorar las técnicas de metalización, ya que los procesos anteriores se han realizado con una calidad bastante elevada. Si se mejora esta metalización es posible que se puedan diseñar, fabricar y caracterizar otros dispositivos que forman los sistemas de telecomunicaciones de esta manera. Pero para ello, la metalización tiene que ser mucho más precisa, ya que las imperfecciones cambian el funcionamiento del dispositivo diseñado.



## CAPÍTULO 5. Bibliografía

### 5.1 Referencias

- [1] L.S. Araujo, X. Shang, M.J. Lancaster, A.J.B. de Oliveira, I. Llamas-Garro, J. -M. Kim, M. Favre, M. Billod, E. de Rijk, “*3-D Printed Band-Pass Comblne Filter*”, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 59, No. 6, pp. 1388–1390, June 2017.
- [2] A. Georgiadis, S. Via, A. Collado, F. Mira, “*Push-push oscillator design based on a substrate integrated waveguide (SIW) resonator*”, in Proceedings of European Microwave Conference, October 2009, Rome (Italy).
- [3] I. Llamas-Garro, M.T. de Melo, J. Kim, “*Frequency Measurement Technology*”, published by Artech House. January 2018.
- [4] Y. S. Lee, S. M. Sim, H. L. Kang, F. Mira, I. Llamas-Garro, Y. Wang, Y. H. Jang, J. M. Kim,, “*Two-way Waveguide Power Divider using 3D Printing and Electroless Plating*”, in Proceedings of European Microwave Week, September 2018, Madrid (Spain).
- [5] CTTC. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <http://www.cttc.es/about-cttc/history-cttc/>.
- [6] ANSYS HFSS. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <https://www.ansys.com/es-es/products/electronics/ansys-hfss>.
- [7] Pozar, D.M., “*Microwave engineering*”, Fourth Edition, John Wiley and Sons (2015).
- [8] Pasternack. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <https://www.pasternack.com/wr-62-waveguides-category.aspx>.
- [9] Mono2 3D Printer. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <https://www.monoprinter.com/pages/mono2-3d-resin-printer>.
- [10] MonoWare. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <https://www.monoprinter.com/pages/software-and-manual-download>.
- [11] Maker Juice. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: <https://makerjuice.com/products/sf-for-form-1?variant=18252746307>.
- [12] Y. Lee, S. Sim, H. Kang, F. Mira, I. Llamas-Garro, Y. Wang, Y. Jang, J. Kim, “*Fabrication of air-filled waveguide filter with pillar array using 3D printing and MEMS copper-plating method*”, in Proceedings of 43 International Conference on Micro and Nano engineering (mne2017), 18-22, September, 2017. Braga (Portugal).

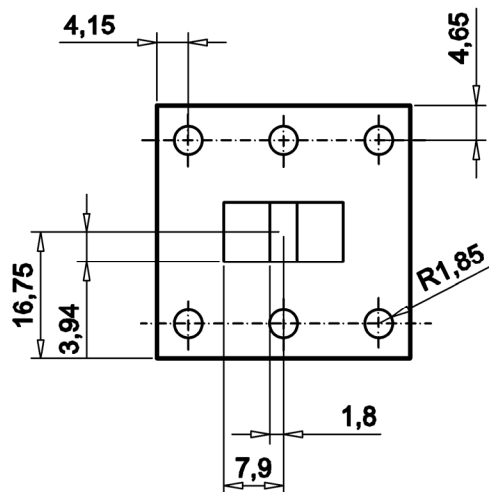
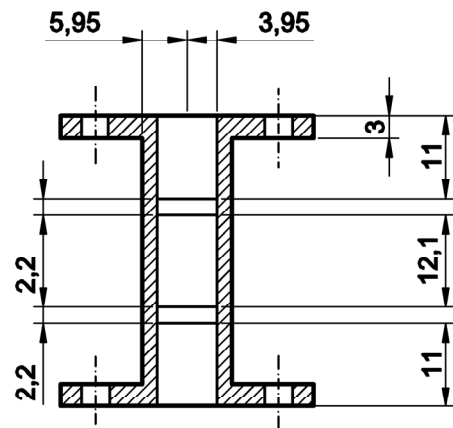
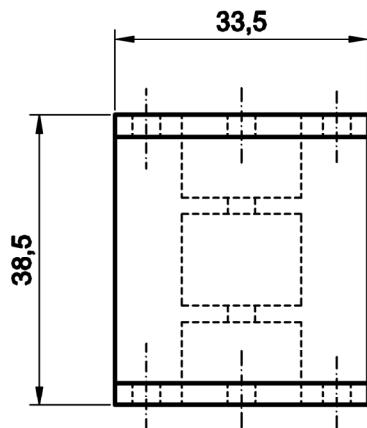
[13] Cinta de cobre de Amazon. Consultado por última vez el 05/02/2019 en: [https://www.amazon.es/URXTRAL-conductividad-manualidades-reparaciones-el%C3%A9ctricas/dp/B071X6RMC3/ref=sr\\_1\\_3?ie=UTF8&qid=1549537396&sr=8-3&keywords=Cinta+De+Cobre+Adhesiva](https://www.amazon.es/URXTRAL-conductividad-manualidades-reparaciones-el%C3%A9ctricas/dp/B071X6RMC3/ref=sr_1_3?ie=UTF8&qid=1549537396&sr=8-3&keywords=Cinta+De+Cobre+Adhesiva).

## **5.2 Bibliografía de imágenes**

Fig. 4.20 Trazado de impresión de impresora SLA y DLP. Origen: 3DHUB. Consultado por última vez el 10/01/2019 en: <https://www.3dhub.gr/comparison-sla-vs-dlp/>.

Fig. 4.21 Funcionamiento de impresora DLP. Origen: Cell Code. Consultado por última vez el 10/01/2019 en: <https://cellcode.us/quotes/parts-fused-printer-deposition-modeling.html>.

Fig. 4.24 Cinta adhesiva de cobre. Origen: Alibaba.com. Consultado por última vez el 07/01/2019 en: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/ct2100-double-sided-copper-foil-tape-with-conductive-adhesive-60642748260.html>.



TOLERANCIAS GENERALES: NORMA UNE 1120 96

UNIDAD EMPLEADA: MILÍMETROS

ESTE DOCUMENTO ESTÁ PROTEGIDO POR LOS DERECHOS DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL, ASÍ COMO LA COPIA, SIN AUTORIZACIÓN EXPRESA DE SU TITULAR.

ESCALA 1 : 1	SISTEMA 	FORMATO UNE A-4	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA INGENIERÍA DE SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN E. COLABORADORA: CTTC	
	AUTOR	FECHA	FIRMA	PROYECTO  DISEÑO DE RESONADORES Y CIRCUITOS MICROONDAS IMPRESOS EN 3D
DIBUJADO	DAVID MELGAR SANZ	08/02/19		
COMPROBADO				
Vº Rº NORMAS				PLANO RESONADOR
DIRECTOR PROYECTO	IGNACIO LLAMAS-GARRO			
ARCHIVO RESONADOR.DWG	SUSTITUIDO POR		SUSTITUYE A	
				REV. HOJA 1 DE 1